

## ANALISI DELL'EFFETTO DI SCABREZZE IRREGOLARI 2D E 3D SUI CAMPI DI MOTO TURBOLENTI.

M. De Marchis<sup>1</sup> & E. Napoli<sup>2</sup>

- (1) Facoltà di Ingegneria e Architettura, Università di Enna Kore, Italia, e-mail: mauro.demarchis@unikore.it  
(2) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali, Università di Palermo, Italia, e-mail: enrico.napoli@unipa.it

### SOMMARIO

*L'effetto della scabrezza di parete irregolare è stato investigato utilizzando la tecnica della Large Eddy Simulation (LES) risolta. Si sono confrontati gli effetti di una scabrezza irregolare 2D e una irregolare 3D. Entrambe sono state ottenute attraverso la sovrapposizione di più funzioni sinusoidali. La scabrezza 2D è stata ottenuta replicando, su tutta la sezione trasversale del canale, l'irregolarità longitudinale, mentre la scabrezza 3D è stata realizzata sovrapponendo 4 funzioni sinusoidali sia nella direzione longitudinale che in quella trasversale. Le due configurazioni scabre sono state opportunamente scalate in modo da avere la stessa altezza media delle corrugazioni. I risultati hanno evidenziato che la scabrezza 3D causa una maggiore riduzione della velocità longitudinale rispetto al caso 2D e di conseguenza la funzione scabrezza risulta più grande nel caso di irregolarità tridimensionali. Tale risultato trova riscontro nella dipendenza tra la funzione scabrezza e la pendenza media delle oscillazioni ES. La scabrezza 3D è infatti caratterizzata da un maggiore valore di ES a parità di altezza media delle oscillazioni, confermando che quest'ultimo non risulta un parametro geometrico completamente efficace per la caratterizzazione della scabrezza di parete. L'analisi delle intensità turbolente mostra che gli effetti di una rugosità irregolare sono confinati prevalentemente in una regione prossima alla parete a supporto dell'ipotesi di similarità di Townsend. L'analisi delle intensità turbolente mostra come la scabrezza riduce notevolmente l'anisotropia. Tale risultato viene chiaramente confermato anche dall'analisi della mappa degli invarianti del tensore anisotropo.*

### 1 INTRODUZIONE

L'effetto della rugosità sui campi di moto turbolenti è un tema di rilevante interesse in differenti campi dell'ingegneria applicata. Tra questi vanno certamente annoverati la meteorologia, l'idraulica in condotti in pressione o in canali a superficie libera, l'aeronautica. Diversi studi sono stati condotti in tal senso sia attraverso esperimenti di laboratorio che mediante esperimenti numerici. Una interessante disanima dei suddetti studi è stata condotta da Jimenez (2004). Le diverse ricerche fino ad ora condotte hanno rappresentato la scabrezza attraverso differenti forme geometriche facendo prevalentemente ricorso a geometrie regolari per forma e distribuzione. La scabrezza è stata, infatti, riprodotta attraverso elementi 2D aventi tutti la stessa forma e regolarmente posizionati su di una superficie altrimenti liscia (si veda tra gli altri Leonardi et al. (2003); Ikeda & Durbin (2007)). Nelle reali applicazioni dell'ingegneria idraulica ambientale la rugosità di una

superficie è certamente di tipo irregolare e tridimensionale. Acharya et al. (1986), attraverso esperimenti di laboratorio, posero in evidenza come una scabrezza 3D possa avere un effetto molto diverso rispetto a quello 2D, a causa della non omogeneità lungo la direzione trasversale. Antonia & Krogstad (2001), attraverso esperimenti di laboratorio, analizzarono l'effetto di una scabrezza costituita da barre trasversali regolarmente disposte lungo una superficie piana e quello di una scabrezza 3D costituita da maglie di acciaio regolari. Le due geometrie sono state realizzate in modo da generare la stessa funzione scabrezza. I loro studi hanno dimostrato come geometrie che producono la stessa funzione scabrezza, possono generare statistiche del secondo ordine molto differenti. Gli autori inoltre osservarono che la rugosità di tipo 3D riduce l'anisotropia in misura maggiore rispetto alla configurazione 2D. Risultati analoghi furono ottenuti da Smalley et al. (2002) nel confronto tra due diverse geometrie 2D e due differenti configurazioni 3D. Successivamente, Tachie et al. (2003), attraverso il confronto tra geometrie costituite da sabbia granulata e maglie intrecciate, osservarono che la geometria a maglie regolari intrecciate modifica le caratteristiche turbolente del moto in misura maggiore rispetto alla sabbia, sia nella regione prossima alla parete che in quella più esterna, nota come *outer layer*. Flack et al. (2005) e Schultz & Flack (2005) condussero esperimenti di laboratorio in geometrie simili, ma diversamente da Tachie et al. (2003), gli autori osservarono differenze solo nella zona di parete (*inner layer*), confermando l'ipotesi di similarità di (Townsend, 1976), per entrambe le geometrie. Recentemente Shah et al. (2008) confrontarono l'effetto di una scabrezza 2D, costituita da barre trasversali regolarmente disposte, con quello di una scabrezza 3D costituita da maglie intrecciate regolari, constatando che gli effetti della scabrezza 2D sono confinati in una regione prossima alla parete mentre quelli di una scabrezza 3D si estendono nell'*outer layer*.

In tutte le ricerche sopra citate si è fatto riferimento unicamente a geometrie di pareti scabre, siano esse 2D o 3D, di tipo regolari. Di contro la scabrezza, nelle reali applicazioni ingegneristiche, è caratterizzata da un andamento irregolare con picchi e cavi, spiccatamente tridimensionali, di altezze variabili. I primi studi in cui geometrie irregolari sono state analizzate si devono a Bons (2002) che, analizzando diverse turbine degradate, ha osservato come i meccanismi di degradazioni possono modificare notevolmente il coefficiente di attrito e la diffusione del calore rispetto a quanto osservato nel caso di superficie rese scabre artificialmente mediante barre regolari. In seguito, Subramanian et al. (2004) mostrarono come un flusso turbolento sopra una turbina degradata comporti un aumento delle intensità turbolente, con una tendenza verso l'isotropizzazione, sebbene tale effetto sia confinato alla regione di parete. Wu & Christensen (2006), attraverso esperimenti di laboratorio, hanno riprodotto un flusso turbolento su una superficie irregolare di una pala di turbina, osservando che la scabrezza genera un notevole aumento degli sforzi di Reynolds nell'*inner layer*, attribuendo tale comportamento all'incremento di intensi fenomeni di *sweep* ed *ejection*.

La totalità delle sopra citate ricerche sono state condotte mediante esperimenti di laboratorio, mentre solo pochi studi di campi di moto turbolenti su superfici scabre 3D sono stati condotti attraverso modellazione numerica. Ciò trova giustificazione nella difficoltà di riprodurre un dominio computazionale quale quello di una superficie irregolare tridimensionale. I pochi studi presenti in letteratura, come precedentemente esposto, hanno considerato scabrezze 3D di tipo regolare. Gli studi sono stati condotti quasi esclusivamente attraverso tecniche di Simulazione Numerica Diretta (DNS). Tra i vari studi si

annoverano quelli di Singh et al. (2007), in cui la scabrezza è stata riprodotta mediante sfere di dimensione uniforme, di Bhaganagar et al. (2004), i quali confrontando l'effetto di tre superficie aventi stessa forma *egg carton* ma altezza media crescente, di Coceal et al. (2006), che analizzando l'effetto di una scabrezza 3D costituita da cubetti tutti della stessa dimensione disposti regolarmente, di Bhaganagar & Hsu (2009), i quali investigarono superfici 2D e 3D ottenute attraverso forme sinusoidali. Più recentemente, Lee et al. (2011) confrontarono l'effetto tra barre prismatiche disposte trasversalmente e cubi 3D regolarmente disposti su superfici altrimenti piane, osservando che la scabrezza 3D produce una minore effetto rispetto a quello prodotto dalle barre 2D.

Le ricerche sopra citate hanno fatto riferimento unicamente a geometrie tridimensionali di tipo regolare. Superfici irregolari sono state studiate numericamente da Napoli et al. (2008) e De Marchis et al. (2010) (di seguito indicate con DNA10), attraverso tecniche di LES. Gli autori osservarono l'effetto di una scabrezza irregolare generata attraverso la sovrapposizione di più funzioni sinusoidali. I risultati mostrano come la scabrezza modifica sostanzialmente le statistiche turbolenti nella regione prossima alla parete, mentre l'outer layer non subisce variazioni.

Obiettivo della presente ricerca è quello di analizzare l'effetto di una scabrezza 3D irregolare con riferimento ai risultati ottenuti su una superficie 2D e su una superficie piana, investigando sull'interazione tra l'inner e l'outer layer. A tal fine, nella presente memoria vengono analizzate le variazioni indotte sulle statistiche turbolente che si sviluppano in un canale delimitato da due lastre piane e parallele.

## 2 APPROCCIO NUMERICO

### 2.1 Formulazione matematica e procedura numerica

Il campo di moto turbolento all'interno di una canale è stato risolto numericamente mediante LES risolta. Le equazioni di Navier-Stokes filtrate, accoppiate all'equazione di continuità, e adimensionalizzate rispetto alla velocità di attrito  $u^*$  e alla semi altezza del canale  $\delta$ , assumono la forma:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} - \frac{1}{Re_\tau} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \Pi \delta_{i1} = 0 \quad (1)$$

dove il simbolo  $\bar{\cdot}$  indica le grandezze filtrate,  $t$  il tempo,  $u_i$  la  $i$ -esima componente della velocità filtrata,  $x_i$  l' $i$ -esimo asse di riferimento,  $p$  il campo di pressione filtrato diviso per la densità,  $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$  il generico elemento del tensore degli sforzi turbolenti alla scala di sotto-griglia,  $Re_\tau = u^* \delta / \nu$  rappresenta il numero di Reynolds d'attrito,  $\Pi$  il gradiente di pressione imposto per mantenere il campo di moto mentre  $\delta_{ij}$  è la funzione di Kronecker ( $\delta_{ij} = 1$  per  $i = j$ ,  $\delta_{ij} = 0$  per  $i \neq j$ ).

Le equazioni del moto sono state risolte utilizzando un codice numerico ai volumi finiti detto PANORMUS (PARallel Numerical Open-souRce Model for Unsteady flow Simulations) (Napoli, 2011), accurato al secondo ordine nel tempo e nello spazio, basato sul metodo del fractional-step. Il modello di sottogriglia utilizzato è quello dinamico misto (per maggiori dettagli sul modello e sulle equazioni si rimanda a Lipari & Napoli (2008) e Napoli et al. (2008)). Le simulazioni sono state condotte suddividendo il dominio computazionale attraverso una griglia curvilinea che si adatta ai contorni solidi. Lungo

le direzioni longitudinale e trasversale sono state imposte le condizioni di periodicit , mentre in corrispondenza delle pareti scabre   stata imposta la condizione di aderenza.

## 2.2 Geometria del dominio e parametri numerici

L'effetto della scabrezza di parete   stato analizzato considerando due differenti configurazioni geometriche irregolari e confrontando i risultati con quelli ottenuti su parete liscia. La prima configurazione geometrica, gi  analizzata in DNA10,   stata ottenuta attraverso la sovrapposizione di quattro funzioni sinusoidali aventi ampiezza delle oscillazioni variabili casualmente:

$$r(x_1) = \sum_{i=1}^{n_1} A_i \sin\left(\frac{2i\pi x_1}{L_{x_1}/2}\right), \quad (2)$$

dove  $r(x_1)$  rappresenta la distanza della parete dal piano di riferimento coincidente con il piano della parete liscia,  $L_{x_1}$    la lunghezza del canale,  $n_1$    il numero delle funzioni sinusoidali,  $A_i$  e  $L_{x_1}/2i$  sono rispettivamente l'ampiezza e la lunghezza d'onda della  $i$ -esima funzione sinusoidale applicata alla direzione longitudinale. La scabrezza cos  definita   di tipo bidimensionale in quanto l'altezza della parete dipende solo dalla coordinata  $x_1$ . La seconda superficie irregolare   stata ottenuta attraverso il prodotto della sovrapposizione di pi  funzioni sinusoidali applicate nella direzione longitudinale e trasversale. La superficie   stata ottenuta attraverso l'equazione:

$$r(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^{n_1} A_i \sin\left(\frac{2i\pi x_1}{L_{x_1}/2}\right) \cdot \sum_{j=1}^{n_2} B_j \sin\left(\frac{2j\pi x_2}{L_{x_2}/2}\right), \quad (3)$$

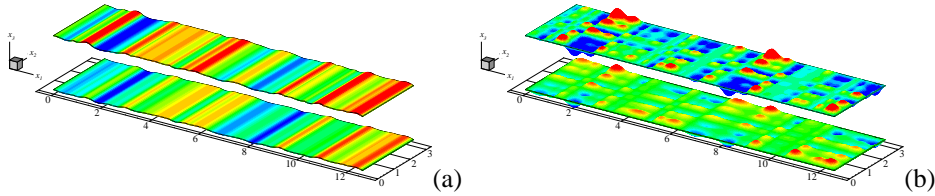
dove  $r(x_1, x_2)$    la distanza della parete dalla superficie piana di riferimento,  $L_{x_2}$    la larghezza del dominio,  $n_2$  il numero delle funzioni sinusoidali lungo la direzione trasversale,  $B_j$  e  $L_{x_2}/2j$  sono rispettivamente l'ampiezza casuale e la lunghezza d'onda della  $j$ -esima funzione sinusoidale applicata lungo la direzione trasversale. Le ampiezze  $A_i$  e  $B_j$  con  $i = j = 1$  sono state imposte pari a 1, mentre quelle caratterizzate da maggiori numeri d'onda sono state ottenute randomicamente in un intervallo compreso tra 0 e 1. Per entrambe le geometrie ottenute si   quindi proceduto a scalare le irregolarit  in modo che le due superfici fossero caratterizzate dallo stesso valore dell'altezza media  $\bar{r}(x_1)$  e  $\bar{r}(x_1, x_2)$  calcolate attraverso le formulazioni seguenti:

$$\bar{r}(x_1) = \frac{1}{\delta} \frac{1}{L_{x_1}} \int_{L_{x_1}} |r(x_1)| dx_1 \quad (4)$$

e

$$\bar{r}(x_1, x_2) = \frac{1}{\delta} \frac{1}{L_{x_1} L_{x_2}} \int_{L_{x_1} L_{x_2}} |r(x_1, x_2)| dx_1 dx_2 \quad (5)$$

Nella presente ricerca si   scelto di utilizzare, quale superficie irregolare 2D, il caso  $C_6$  gi  analizzato in DNA10, caratterizzato da un'altezza media delle oscillazioni  $\bar{r}(x_1) = 0.05$ . La scelta   stata dettata dal fatto che per tale geometria   garantito il raggiungimento della condizione di regime di moto puramente turbolento. Come in precedenza specificato, la scabrezza 3D   stata opportunamente scalata in modo da ottenere lo stesso valore di altezza media delle oscillazioni.



**Figura 1.** Rappresentazione 3D dei domini analizzati. (a): scabrezza irregolare 2D; (b): scabrezza irregolare 3D.

In Fig. 1 è riportata una rappresentazione tridimensionale dei due domini analizzati. Come si può osservare entrambe le superfici del canale sono state rese irregolari attraverso la sovrapposizione delle funzioni sinusoidali, ma in ragione del fatto che l'ampiezza delle suddette funzioni è stata ottenuta in modo casuale, le superfici superiore ed inferiore presentano forme simili ma non identiche.

Analogamente a quanto riportato in DNA10, entrambe le superfici sono state studiate per  $Re_\tau = u^* \delta / \nu = 395$ . La scelta di mantenere un basso valore del numero di Reynolds deriva dall'aumento dell'onere computazionale necessario a risolvere correttamente una superficie irregolare 3D. Per la scabrezza 2D è risultata sufficiente una griglia computazionale costituita da  $256 \times 64 \times 64$  celle di calcolo rispettivamente lungo le direzioni longitudinale, trasversale e verticale. Data la dimensione del dominio, pari a  $4\pi$  e  $\pi$  in direzione longitudinale e trasversale, e operando una distribuzione uniforme, si è ottenuta una griglia computazionale con celle di dimensione pari a  $\Delta x_1^+ = \Delta x_2^+ = 19$  unità di parete. La stessa risoluzione è stata utilizzata per le simulazioni condotte su superficie liscia. Nel caso di pareti scabre 3D si è reso necessario raddoppiare il numero di celle computazionali in direzione trasversale, suddividendo il dominio attraverso  $256 \times 128 \times 64$  celle. In tal modo la risoluzione spaziale della griglia di calcolo in direzione trasversale è stata ridotta a  $\Delta x_2^+ = 9.5$ . Tale aumento di risoluzione è stato dettato dal fatto che le irregolarità 3D rompono le strutture turbolente in direzione trasversale in misura maggiore rispetto al caso 2D. In tutti i domini analizzati, parete liscia, scabrezza 2D e scabrezza 3D, in direzione verticale la griglia è stata suddivisa in maniera non uniforme, attraverso una funzione iperbolica, in modo che il primo nodo di calcolo fosse ad una distanza dalla parete inferiore ad una unità di parete e la massima dimensione della cella di calcolo, in corrispondenza del centro del canale, fosse pari a 30 unità di parete. In tabella 1 sono riportati i parametri geometrici caratteristici delle due superfici scabre.

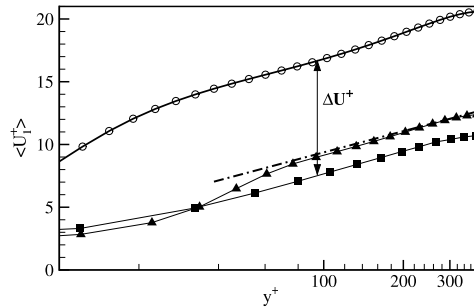
Le simulazioni sono state condotte fino al raggiungimento della condizione di convergenza statistica, verificata attraverso la linearità degli sforzi tangenziali totali.

### 3 ANALISI DEI RISULTATI

Uno dei principali effetti della scabrezza di parete è la riduzione del profilo di velocità longitudinale rispetto alla condizione di parete liscia. Tale abbassamento è noto in letteratura come *funzione scabrezza*  $\Delta U^+$ . In figura 2 sono riportati, in scala semi-logaritmica, i profili della velocità media in direzione longitudinale, normalizzati rispetto alla velocità d'attrito  $u^*$  per le due configurazioni scabre e per quella di parete liscia. In figura le distanze verticali dimensionali  $y^+$  sono misurate a partire dalla superficie piana di riferimento alla quale le funzioni sinusoidali sono state imposte. Tale superficie coincide con

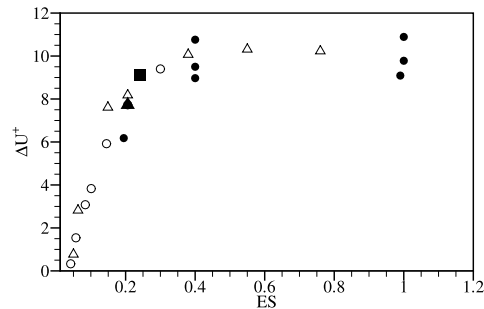
Case	$\bar{r}$	$\bar{r}^+$	$h_{rms}$	$h_{rms}^+$	$k_s$	$k_s^+$	$h_{max}$	$h_{max}^+$	ES
2D	0.05	19.75	0.06	23.70	0.20	79.0	0.14	55.30	0.206
3D	0.05	19.75	0.07	27.70	0.36	142.2	0.37	146.15	0.239

**Tabella 1.** Parametri geometrici dell superfici scabre.  $\bar{r}$  e  $\bar{r}^+$ : altezza media delle oscillazioni rese adimensionali rispettivamente con la semi altezza del canale  $\delta$  e in unità di parete. Analogamente,  $h_{rms}$  and  $h_{rms}^+$  sono gli scarti quadratici medi delle oscillazioni,  $k_s$  and  $k_s^+$  sono le scabrezza equivalenti, mentre  $h_{max}$  and  $h_{max}^+$  rappresentano l'altezza del picco massimo. Infine con ES si riporta il valore della pendenza effettiva definita in Napoli et al. (2008).



**Figura 2.** Mean velocity profiles for the analyzed cases: -o-, smooth case; -▲-, 2D rough wall; -■-, 3D rough wall. Continuous line, smooth wall case; Dot-dash line, limit of the fully rough wall:  $\langle U_1^+ \rangle = (1/\kappa)\log(y^+/k_s^+) + 8.5$  with  $k_s^+ = 70$ .

l'origine virtuale definita da Jackson (1981). I profili mostrati in figura 2 rappresentano quantità mediate nel tempo e nei piani  $x_1x_2$ . Inoltre, in considerazione del fatto che la parete superiore e quella inferiore che delimitano il canale, pur avendo forma leggermente differente, hanno le stesse statistiche geometriche, le quantità sono state calcolate considerando la simmetria rispetto al centro del canale. Nel prosieguo si indicherà con il simbolo  $\langle \cdot \rangle$  valori mediati nel tempo, nello spazio e rispetto al centro del canale, mentre quantità mediate solo rispetto al tempo saranno indicate con il simbolo  $\langle \cdot \rangle_t$ . In figura 2 è altresì riportato il profilo analitico delle velocità  $U^+ = (1/\kappa)\log(y^+/k_s^+) + 8.5$  con  $k_s^+ = 70$ , che divide la zona di transizione da quella puramente turbolenta. Come si può osservare, sebbene le due geometrie scabre siano state disegnate in modo da avere lo stesso valore di altezza media  $\bar{r}^+ (\approx 20)$ , la scabrezza 3D produce una funzione scabrezza decisamente maggiore rispetto al caso 2D. Nello specifico, si è ottenuto un valore  $\Delta U^+ = 9.1$  per il caso 3D e  $\Delta U^+ = 7.6$  per quello 2D. Ciò induce a pensare che una scabrezza 3D produca effetti maggiori sul campo di moto rispetto a quelli prodotti da una scabrezza 2D. Tale risultato è in contrasto con quanto recentemente ottenuto da Lee et al. (2011), i quali confrontando l'effetto di una scabrezza 3D costruita mediante cubetti sparsi su superfici piane con quelli ottenuti da una scabrezza ottenuta mediante barre prismatiche disposte trasversalmente al moto, osservarono la funzione scabrezza era maggiore nel caso 2D. Dall'altro lato però i risultati qui raggiunti trovano accordo con quelli ottenuti da Bhaganagar & Hsu (2009) dove sono stati confrontati gli effetti di due superfici 2D e 3D ottenute come intersezione di funzioni sinusoidali. L'accordo con i risultati ottenuti da Bhaganagar & Hsu (2009) e il disaccordo con quelli di Lee et al. (2011) può trovare



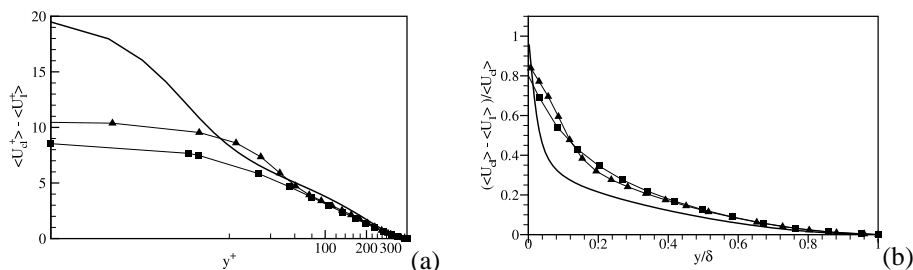
**Figura 3.**  $\Delta U^+$  in funzione della pendenza effettiva  $ES$ :  $\blacktriangle$ , 2D roughness;  $\blacksquare$ , 3D roughness;  $\Delta$ , Napoli et al. (2008);  $\circ$ , De Marchis et al. (2010);  $\bullet$ , Schultz & Flack (2009)

giustificazione nella differente forma geometrica delle scabrezze che in un caso assumono una forma morbida ondulata mentre nel caso di Lee et al. (2011) si ha una forma spigolosa netta che causa una maggiore resistenza di pressione. Tale spiegazione è certamente coerente con quanto osservato da Schultz & Flack (2009) secondo cui, sulla base della pendenza effettiva  $ES$  è possibile distinguere tra un regime di tipo *waviness* (ondulato) e uno di tipo *roughness* (scabro), in cui il primo si verifica per bassi valori di  $ES$  mentre il secondo, tipico delle superfici caratterizzate da contorni netti e angoli spigolosi come le barre prismatiche, si verifica nel caso di valori di  $ES$  elevati.

Il fatto che le due configurazioni, pur avendo la stessa altezza media delle oscillazioni  $\bar{r}^+$ , producano valori differenti della funzione scabrezza mostra come  $\bar{r}^+$  non si possa considerare un parametro per rappresentare geometricamente l'effetto della rugosità di parete. Inoltre, Napoli et al. (2008) e Schultz & Flack (2009) hanno chiaramente mostrato che un parametro chiave rappresentativo delle geometrie scabre è la pendenza effettiva  $ES$ . Come riportato in tabella 1 la scabrezza 2D è caratterizzata da una pendenza effettiva pari a 0.206, mentre la geometria 3D è caratterizzata da un valore di  $ES=0.239$ . Il maggiore valore di  $ES$  spiega il maggiore valore della funzione scabrezza per il caso 3D.

In figura 3 i valori della funzione scabrezza ottenuti nelle presenti simulazioni sono stati plottati con riferimento alla pendenza effettiva, nella stessa figura sono state altresì riportati i risultati ottenuti da Napoli et al. (2008) and Schultz & Flack (2009), che hanno considerato rispettivamente geometrie 2D e 3D. Come si può osservare i punti rappresentativi delle presenti simulazioni si collocano perfettamente nella regione del diagramma in cui esiste una dipendenza quasi lineare tra  $\Delta U^+$  e  $ES$ , mostrando che anche per geometrie irregolari casuali di tipo tridimensionali il parametro geometrico più rappresentativo è la pendenza effettiva  $ES$ . Al fine di confermare tale primo risultato ulteriori analisi sono attualmente in corso.

Al fine di investigare sull'interazione tra *inter* e *outerregion* in figura 4(a) è mostrato il confronto tra la legge del difetto di velocità nel caso di parete liscia e nei casi di scabrezza 2D e 3D. Come si può osservare i profili ottenuti in parete scabra si accostano a quello in parete liscia in quasi tutta la regione esterna alla parete, sebbene qualche leggera variazione si osservi in un intervallo compreso tra 70 and 200 unità di parete. Di contro nella regione prossima alla parete si può chiaramente osservare come l'effetto della scabrezza sia dominante e che, nuovamente, la scabrezza 3D produce una maggiore deviazione dalla condizione di parete liscia rispetto al caso di scabrezza 2D. Tale risultato



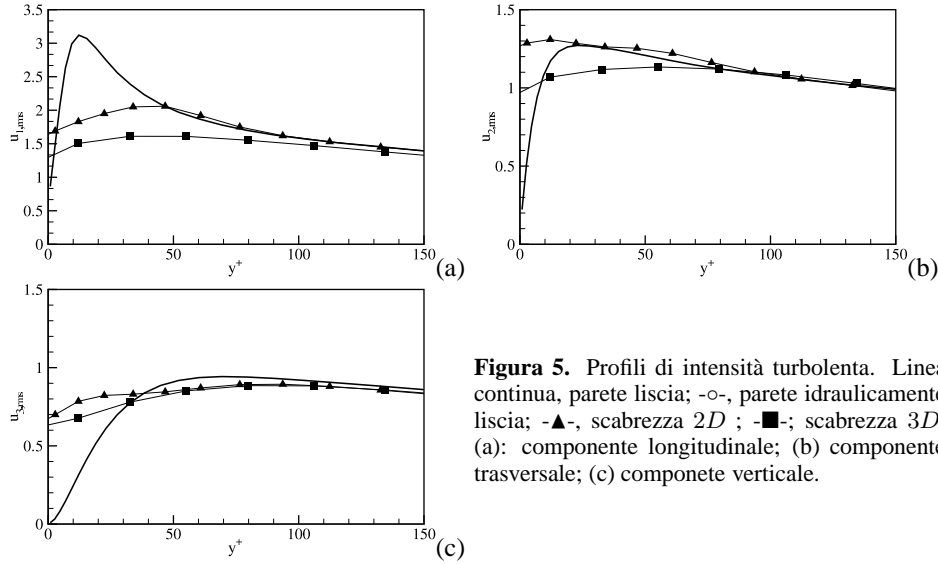
**Figura 4.** Legge del difetto di velocità. Linea continua, parete liscia; -o-, parete idraulicamente liscia; -▲-, scabrezza 2D ; -■-, scabrezza 3D. (a): scalate rispetto alle lunghezze scala dell'inner layer; (b) scalata rispetto alle lunghezze scala dell'outer layer

trova accordo in letteratura con diverse ricerche scientifiche ((Antonia & Krogstad, 2001; Bhaganagar et al., 2004; Lee et al., 2011)) è rappresenta il primo indicatore della validità dell'ipotesi di similarità. Al fine di investigare ulteriormente circa l'ipotesi di similarità, in figura 4(b) il profilo di velocità medio è stato scalato con le lunghezze scala della regione centrale del canale. Come suggerito da Bakken et al. (2005), nel caso di canali turbolenti, l'unica lunghezza scala per le coordinate è la semi altezza del canale  $\delta$ , mentre per quanto concerne la velocità la miglior grandezza scala è rappresentata dalla velocità in corrispondenza del centro del canale  $\langle U_{cl} \rangle$ . La figura mostra come in questo caso i profili ottenuti in parete scabra differiscono da quello in parete liscia in tutto il dominio. Tale risultato tuttavia non smentisce l'ipotesi di similarità essendo invece coerente con quanto osservato in figura 2. Inoltre il risultato trova conforto con quanto riportato da Brzek et al. (2007). Un'analisi più accurata dell'ipotesi di similarità deve necessariamente tenere in considerazione anche le statistiche di ordine superiore.

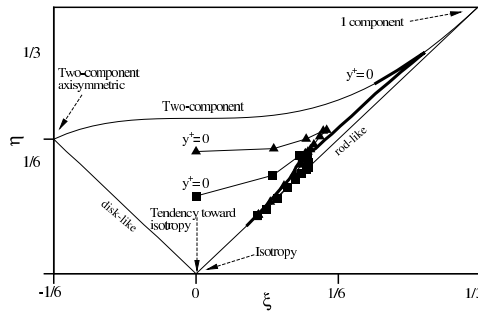
Di seguito sono analizzati i profili delle intensità turbolente, indicate con  $u_{i,rms}$ , per le varie configurazioni geometriche qui analizzate. Le intensità turbolente, mostrate in figura 3, si intendono comprensive del contributo di sottogriglia che, come specificato in precedenza, è stato ottenuto attraverso il modello dinamico misto.

L'analisi delle tre componenti mostra chiaramente come in generale la scabrezza 3D produce effetti maggiori sul campo di moto. Le variazioni interessano quasi esclusivamente la regione prossima alla parete, mentre, coerentemente con quanto osservato da De Marchis et al. (2010) e Lee et al. (2011), nelle regioni centrali del campo si moto i profili assumono tutti lo stesso andamento indipendentemente dalla condizione al contorno della parete, sia essa liscia o scabra, a riprova che questa non influenza le regioni più distanti. Particolare rilevanza assume il fatto che i picchi delle intensità turbolente, tipici della condizione di parete liscia, nel caso di parete scabra non si verificano, ma che i profili assumo un andamento quasi piatto con piccole variazioni lungo la verticale. Tale comportamento è certamente maggiormente accentuato nel caso di corrugazioni tridimensionali. L'effetto della scabrezza sembra chiaramente volto alla riduzione di anisotropia del campo di moto. La tendenza verso l'isotropizzazione indotta dalla scabrezza di parete viene confermata attraverso lo studio della mappa degli invarianti del tensore anisotropo degli sforzi di Reynolds (AIM), mostrata in figura Fig. 6. La mappa ha per assi gli invarianti  $\xi$  and  $\eta$  del tensore anisotropo degli sforzi di Reynolds. Tutti gli stati della turbolenza ricadono all'interno del triangolo delimitato da: una curva superiore definita dalla funzione





**Figura 5.** Profili di intensità turbolenta. Linea continua, parete liscia; -o-, parete idraulicamente liscia; -▲-, scabrezza 2D ; -■-, scabrezza 3D. (a): componente longitudinale; (b) componente trasversale; (c) componente verticale.



**Figura 6.** Mappa degli Invarianti del tensore anisotropo degli sforzi di Reynolds; -▲-, scabrezza 2D; -■-, scabrezza 3D.  $\eta = b_{ij}b_{ji}$  e  $\xi = b_{ij}b_{jk}b_{ki}$  rappresentano il secondo e il terzo invariante del tensore anisotropo degli sforzi di Reynolds.

$F = 1 - 27\eta^2 + 54\xi^3 = 0$ ; una linea sinistra definita da  $\eta = -\xi$  cui corrisponde uno stato della turbolenza (disk-like) in cui due componenti del tensore anisotropo degli sforzi di Reynolds sono più grandi della terza; una linea destra definita da  $\eta = \xi$  caratteristica di uno stato della turbolenza (rod-like) in cui una componente diagonale è molto maggiore delle altre due. La condizione di isotropia della turbolenza è verificata in corrispondenza dell'origine degli assi ( $\eta = \xi = 0$ ). In figura 6 sono mostrati i profili ottenuti nei casi di parete liscia, di scabrezza 2D e 3D. Come si può osservare vicino alla parete la scabrezza 3D produce valori prossimi allo zero in misura maggiore rispetto al caso 2D a riprova della maggiore tendenza verso l'isotropizzazione causata dalle irregolarità 3D. Dall'altro lato nelle regioni centrali i profili tornano a sovrapporsi mostrando che l'ipotesi di similitudine è ancora valida. La maggiore tendenza all'isotropizzazione indotta dalla parete scabra 3D trova giustificazione nel fatto che questa distrugge le scale della turbolenza rendendo le dimensioni delle strutture turbolente nelle tre direzioni coordinate confrontabili tra loro.

#### 4 CONCLUSIONI

L'effetto della scabrezza di parete irregolare 2D e 3D sul campo di moto turbolento è stato analizzato mediante tecniche di LES risolta. La scabrezza è stata realizzata attraverso la sovrapposizione di più funzioni sinusoidali su una superficie piana. Le sinusoidi sono state applicate nella direzione longitudinale e trasversale per generare una superficie 3D, mentre la scabrezza 2D è stata realizzata applicando le funzioni sinusoidali solo nella direzione longitudinale. Le due geometrie sono state realizzate in modo che avessero lo stesso valore di altezza media delle oscillazioni  $\bar{\tau}^+ \approx 20$ . Entrambi le pareti del canale sono state corrugate e le simulazioni sono state condotte tutte allo stesso numero di Reynolds  $Re_\tau = 395$ . L'analisi del profilo medio di velocità ha messo in evidenza che la scabrezza 3D genera una funzione scabrezza superiore di circa il 20% rispetto a quella prodotta dalla parete 2D, nonostante il fatto che le due superficie abbiano la stessa altezza media delle oscillazioni. Ciò conferma che un parametro geometrico del primo ordine, quale la media delle oscillazioni, non è sufficiente a rappresentare il comportamento di una scabrezza irregolare. Altri parametri, come la scabrezza equivalente  $k_s$  o la pendenza effettiva  $ES$  sembrano rappresentare meglio gli effetti di una scabrezza di parete. Si noti infatti come la scabrezza 3D, che produce un maggiore valore di  $\Delta U^+$ , sia caratterizzata da maggiori valori di  $ES$ , rispetto al caso 2D. L'analisi della legge del difetto di velocità e delle intensità turbolente hanno mostrato che in generale la scabrezza 3D produce effetti maggiori sul campo di moto ma che questi sono prevalentemente confinati in una regione limitrofa alla parete, favorendo di fatto l'ipotesi di similarità di Townsend. Analogamente la superficie 3D produce una maggiore tendenza verso l'isotropizzazione, come dimostrato attraverso la mappa degli invarianti del tensore degli sforzi di Reynolds. I risultati ottenuti hanno messo in luce che una scabrezza irregolare, simile ad una scabrezza reale, può modificare il campo di moto turbolento in maniera significativa, almeno localmente, rispetto a configurazioni meno realistiche come scabrezze regolari o bidimensionali.

#### BIBLIOGRAFIA

- Acharya, M., Bornstein, J., Escudier, M.P., 1986. Turbulent boundary layers on rough surfaces. *Exp. Fluids* **4**, 33-47.
- Antonia, R.A., Krogstad, P.A., 2001. Turbulent structure in boundary layers over different types of surface roughness. *Fluid Dyn. Res.* **28**, 139-157.
- Bakken, O.M., Krogstad, P.A., Ashrafian, A., Andersonn, H.I., 2005. Reynolds number effects in the outer layer of the turbulent flow in channel with rough walls. *Phys. Fluids* **17**(065101).
- Bhaganagar, K., Kim, J., Coleman, G., 2006. Effect of Roughness on Wall-Bounded Turbulence. *Flow Turbul. Combust.* **72**, 463-492.
- Bhaganagar, K., Hsu, T.J., 2009. Direct numerical simulations of flow over two-dimensional and three-dimensional ripples and implication to sediment transport: Steady flow. *Coast. Eng.* **38**, 320-331.
- Bons, J.P., 2002.  $S_t$  and  $c_f$  Augmentation for Real Turbine Roughness With Elevated Freestream Turbulence. *J. Turbomach.* **124**(4), 632-645.
- Brzek, B., Cal, R.B., Johansson, G., Castillo, L., 2007. Inner and outer scalings in rough surface zero pressure gradient turbulent boundary layers. *Phys. Fluids* **19**, 065101.
- Coccal, O., Thomas, T.G., Castro, I.P., Belcher, S.E., 2006. Mean flow and turbulence statistics over groups of urban-like cubical obstacles. *Boundary-Layer Meteorol.* **121**, 491-519.

- De Marchis, M., Napoli, E., 2008. The effect of geometrical parameters on the discharge capacity of meandering compound channels. *Advances Water Res.* **31**, 1662–1673.
- De Marchis, M., Napoli, E., Armenio, V., 2010. Turbulence structures over irregular rough surfaces. *J. Turb.* **11(3)**, 1–32.
- Flack, K.A., Schultz, M.P., Shapiro, T.A., 2005. Experimental support for Townsend's Reynolds number similarity hypothesis on rough walls. *Phys. Fluids* **17(035102-035102-9)**, 1–9.
- Ikeda, T., Durbin, P., 2007. Direct simulations of a rough-wall channel flow. *J. Fluid Mech.* **561**, 235–263.
- Jackson, P.S., 1981. On the displacement height in the logarithmic profiles. *J. Fluid Mech.* **111**, 15–25.
- Jimenez, J., 2004. Turbulent flows over rough walls. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **36**, 173–196.
- Lee, J.H., Sung, H.J., Krogstad, P.A., 2011. Direct numerical simulation of the turbulent boundary layer over a cube-roughened wall. *J. Fluid Mech.* **669**, 397–431.
- Leonardi, S., Orlandi, P., Smalley, R.J., Djenidi, L., Antonia, R.A., 2003. Direct numerical simulations of turbulent channel flow with transverse square bars on one wall. *J. Fluid Mech.* **491**, 229–238.
- Lipari, G., Napoli, E., 2008. The impacts of the ale and hydrostatic-pressure approaches on the energy budget of unsteady free-surface flows. *Comp. Fluids* **37(6)**, 656–673.
- Napoli, E., Armenio, V., De Marchis, M., 2008. The effect of the slope of irregularly distributed roughness elements on turbulent wall-bounded flows. *J. Fluid Mech.* **613**, 385–394.
- Napoli, E., 2011. PANORMUS User's manual. University of Palermo, Palermo, Italy, 1–74 (available from: [www.panormus3d.org](http://www.panormus3d.org)).
- Schultz, M.P., Flack, K.A., 2005. Outer layer similarity in fully rough turbulent boundary layers. *Exp. Fluids* **38**, 328–340.
- Schultz, M.P., Flack, K.A., 2009. Turbulent boundary layers on a systematically varied rough wall. *Phys. Fluids* **21(015104)**, 1–9.
- Shah, M.K., Agelinchaab, M., Tachie, M.F., 2008. Influence of PIV interrogation area on turbulent statistics up to 4th order moments in smooth and rough wall turbulent flows. *Exp. Therm. and Fluid Sci.* **32**, 725–747.
- Singh, K.M., Sandham, N.D., Williams, J.J., 2007. Numerical simulation of flow over rough bed. *J. Hydraul. Eng.* **133(4)** 386–398.
- Smalley, R.J., Leonardi, S., Antonia, R.A., Djenidi, L., Orlandi, P., 2002. Reynolds stress anisotropy of turbulent rough wall layers. *Exp. Fluids* **33**, 31–37.
- Subramanian, C.S., King, P.I., Reeder, M.F., Ou, S., Rivir, R.B., 2004. Effects of strong irregular roughness on the turbulent boundary layer. *Flow Turbul. Combust.* **72**, 349–368.
- Tachie, M.F., Bergstrom, D.J., Balachandar, R., 2003. Roughness effects in the low- $Re_\theta$  open-channel turbulent boundary layers. *Exp. Fluids* **33**, 338–346.
- Townsend, A.A., 1976. The Structure of Turbulent Shear Flow, 2nd ed. *Cambridge University Press*.
- Wu, Y., Christensen, K.T., 2006. Reynolds-stress enhancement associated with a short fetch of roughness in wall turbulence. *AIAA J.* **44(12)** 3098–3106.